



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Inboard-jarrujen suunnittelu FSO autoon

Hannu Alanen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2021



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Inboard-jarrujen suunnittelu FSO autoon

Hannu Alanen

Ohjaaja: Tapio Korpela ja Eino Antikainen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2021

TIIVISTELMÄ

Inboard-jarrujen suunnittelu FSO autoon

Hannu Alanen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 24 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Tapio Korpela ja Eino Antikainen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää voisiko Oulun Formula Student tiimi käyttää autossaan inboard jarruja taka-akselilla. Aluksi työssä käydään läpi mitä jarrut ovat ja kuinka niillä voidaan vauhtia hidastaa. Työssä tutustutaan jarrutekniikkaan ja tapoihin ohjata jarruja. Tämän lisäksi käydään läpi erilaiset jarrutyypit ja paneudutaan tarkemmin tavallisimpiin jarrutyyppeihin. Työssä tutustutaan tarkemmin kahteen päätyyppiin mekaanisista jarruista, levyjarruun ja rumpujarruun. Inboard jarrut ovat aina levyjarruja ja siksi tutkitaan niiden soveltuvuutta Formula Student tiimin autoon. Sopivuutta tutkitaan 3D mallin avulla suoraan nykyiseen runkoon. Nykyiseen runkoon ei voida asentaa inboard jarruja, sillä rungon perästä loppuu tila kesken. Uusia jarruja olisi mahdollista suunnitella sitten, kun suunnitellaan täysin uusi runko. Lisätutkimista aiheesta jää jäähtyvyyden riittävyyteen, sillä tässä työssä ei huomioida jäähdytystä tai sen tarvetta yksityiskohtaisemmin. Tämän työn tuloksia voidaan käyttää hyväksi siinä vaiheessa, kun inboard jarrujen suunnittelu on ajankohtaista.

Asiasanat: Formula Student, Inboard-jarrut, levyjarru, jarru

ABSTRACT

Inboardbrakes designing in FSO racecar.

Hannu Alanen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 24 pp

Supervisor at the university: Tapio Korpela and Eino Antikainen

The aim of this bachelor's thesis is to find out if the Oulu Formula Student team could use inboard brakes on the rear axle in the car/vehicle. Initially, the work goes through what the brakes are and how they can be used to slow down. The work introduces braking technology and ways to control brakes. In addition to this, we go through the different types of brakes and take a closer look at the most common types of brakes. The work introduces two main types of mechanical brakes, the disc brake and the drum brake. Inboard brakes are always disc brakes and therefore their suitability for the Formula Student team car is being investigated. The fit is examined using a 3D model directly into the current frame. Inboard brakes cannot be installed on the current frame because there is not enough space for the brakes at the rear of body frame. It would be possible to design new brakes when designing a completely new frame. Further research should pay attention to cooling of brakes because this work ignores brakes at cooling point of view. The results of this work can be exploited at a time when the design of inboard brakes is relevant.

Keywords: Formula Student, inboard brake, discbrake, brake

ALKUSANAT

Työn tarkoitus on käydä läpi mahdollisuuksia, voisiko Formula Student Oulun, myöhemmin FSO, auton takajarrut toteuttaa inboard- jarruilla. Työssä on tarkoitus myös selvittää millaisia inboard- jarruja on käytössä, sekä missä ja kuinka hyvin ne toimivat. Formula Student auton kannalta oleellista on myös, että saadaanko eri jarrutyypillä painonsäästöä autossa. Paino on FS (Formula Student) sarjassa erittäin merkittävä tekijä, sillä autojen moottoreiden ilmansaantia on tarkoin säännöillä rajoitettu. Kandidaatin työtä on tehty pikkuhiljaa vuosien 2019–2021 aikana. FS kausi on mennyt ja tämän kandidaatin työn tuloksia ei voida hyödyntää tällä kaudella. Seuraavan kauden autoon asiaa voisi jo harkita riippuen työn tuloksista.

Kandidaatin tutkielman ohjaajana toimi Tapio Korpela ja Eino Antikainen. Työhön sain myös neuvoja vanhemmilta opiskelijoilta, jotka ovat myös mukana FS tiimissä. Kiitokset työn ohjaajalle ja tarkastajalle sekä perheelleni, joka tuki minua tämän työn tekemisessä.

Oulu, 03.02.2021

Hannu Alanen
Hannu Alanen

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

1 Johdanto	5
2 Pohjatietoa jarruista.....	6
2.1 Mitä jarrut ovat?.....	6
2.2 Jarrutekniikka	7
2.2.1 Mekaaninen jarru	7
2.2.2 Hydraulinen jarru.....	8
2.2.3 Pneumaattinen jarru	8
3 Jarrutyypit	9
3.1 Rumpujarru	9
3.2 Levyjarru	11
3.3 Inboard-jarru	14
4 Formula Student.....	15
4.1 Mikä on Formula Student.....	15
4.2 Rajaavat sääntökohdat.....	16
4.3 Aikaisemmat jarrut FSO:n tiimissä.....	17
5 Inboard jarrujen toimivuus FSO autossa.....	18
5.1 Jarrujen sijoittelu.....	18
5.2 Inboard jarrujen hyviä puolia	20
5.3 Mahdollisia ongelman aiheuttajia	20
5.4 Testaus.....	21
6 Käyttö muualla	22
7 Yhteenveto	23
8 Lähteet.....	24

1 JOHDANTO

Työn aiheena on inboard- jarrujen suunnitleminen FSO (Formula Student Oulu) autoon. Aihe on valittu omien mielenkiinnon ja FS (Formula Student) tiimin tarpeen perusteella. Työssä rajataan tutkimusta siten, että tavoitteena on selvittää kuinka hyvin inboard- jarrut sopisivat FS Oulun tiimin autoon. Lisäksi kerrotaan Formula Student sarjasta ja hieman tutkitaan, onko inboard- jarruja yleisemmin käytössä kilpa-autoissa ja jos on niin missä sarjoissa. Työssä perehdytään jarrujen kahteen päätyyppiin, joita ovat levyjarru ja vanhemmat rumpujarrut. Inboard- jarrut toteutetaan yleisesti levyjarruilla. Tutkimus tehdään siksi, että sitä voitaisiin hyödyntää uuden kauden auton takajarrujen suunnittelussa ja toteutuksessa. Tutkimusta tehdään pääasiallisesti ottamalla selvää ongelman rajoitteista ja pohtimalla, miten ongelmat ratkaistaisiin.

FS autoon on tehty useampi kandidaatintyö ja näiden töiden tuloksia on käytetty hyväksi auton kehittämisessä.

2 POHJATIETOJA JARRUISTA

2.1 Mitä jarrut ovat?

Jo ammoisina aikoina on ollut tarve siirtää tavaroita paikasta toiseen ja jo silloin on jouduttu pohtimaan kuinka esineen liikkeen saa pysäytettyä. Ihmisvoimin siirreltäviä tavaroita on liikutettu lihasvoimalla ja lihaksisto sen liikkeen myös silloin pysäyttää. Kun pyörä keksittiin, niin alkoi liikkuminen vilkastua ja silloin liikkuvaa tavaraa on hidastettu esimerkiksi painamalla jalkaa maata vasten tai onpa varmaankin pyörivästä renkaasta otettu kiinnikin. On myös täysin mahdollista, että on huomattu jo silloin lasten leikissä, että kun kärryssä olevan renkaan läpi työntää kepin niin keppi osuu kärryn runkoon ja jättää renkaan jumiin tai kivipyörän eteen on laitettu puu- tai kivipala ja pyörä on saatu pysähtymään. Nämä kaikki esimerkit kuvaavat jarrutusta. Liikkeen hidastamiseksi tehtävää työtä kitkan avulla.

Jarru on yksinkertaisesti liikkeen hidastamiseen, hallitsemiseen ja pysäyttämiseen tarkoitettu laite. Ongelmia aiheuttaa halu pysäyttää liike mahdollisimman nopeasti ilman minkään osa-alueen hajoamista. Hajoavia osa-alueita on pääpiirteissään neljä kappaletta. Mekaaniset osat kuten levyt, sylinterit, palat, säiliöt jne., hydraulinen järjestelmä, jäähdytys ja jarrujen säädettävyyteen liittyvät komponentit. (Milliken & Milliken 1995, s 748)

Jarrujen tekninen tarkoitus on hidastaa liikkuvaa ajoneuvoa renkaan / tiekontaktin kautta, jotta voidaan sopeuttaa vauhti liikenteen olosuhteisiin ja estää ajoneuvon tahaton liikkuminen pysähdyksissä ollessa. Jarrut muuttavat kineettisen energian lämpöenergiaksi jarruihin, josta se päättyy ympäröivään ilmaan. Jarrujen täytyy pystyä kohdistamaan mittavaa vääntömomenttia myös pyörän ollessa paikoillaan. Jarrujen säädettävyys on myös huomioitava erilaisissa olosuhteissa ja myös tasapainottamaan jarrutustapahtumaa eteen / taakse ja oikealle / vasemmalle. (Breuer & Dausend 2003, s 8)

2.2 Jarrutekniikka

Jarrut voivat olla mekaanisesti, hydraulisesti, pneumaattisesti tai elektronisesti ohjatut. Mekaaninen jarru toimii esimerkiksi vaijerilla kuten polkupyörissä, hydraulisessa jarrussa on jarruneste, jolla mäntiä painetaan jarrulevyä vasten. Pneumaattisessa jarrussa ohjaus tapahtuu paineilmalla kuten vaikka esimerkiksi rekoissa. Elektroniset jarrut toimivat magneetti voimalla. (Puhn 1985, s 6)

Jarrujärjestelmä koostuu neljästä perusosa-alueesta. Energian lähde sisältää komponentit, joilla tuotetaan, varastoidaan ja tehdään käytettäväksi jarruttamiseen vaadittava energia. Säätojärjestelmät, joilla voidaan säätää jarruttamisen tasoa, kuten jarrupoljin. Energian kuljettamis- järjestelmät kuten vaijerit tai jarruletkut. Lopuksi järjestelmään kuuluu itse jarrut, joilla energia hyödynnetään ajoneuvon pysäyttämiseen. (Limpert 1999, s 14)

Seuraavaksi käydään läpi tavallisimmat jarrujen ohjaustyyppit. Tavallisimmat ohjaustyyppit ovat mekaaninen-, pneumaattinen- ja hydraulinen jarru. Kaikilla ohjaustavoilla voidaan käyttää levyjarrua tai rumpujarrua.

2.2.1 Mekaaninen jarru

Mekaaniset jarrut ovat olleet ensimmäisiä jarruja, joilla vauhtia on hidastettu painamalla jalkaa maahan tai kapulalla renkaan kylkeä. Nykyisemmin jarrupolkimella ohjataan jarrupalaa, jolla painetaan jarrulevyyn tai -rumpuun. Mekaaniset jarrut perustuvat aina kitkan aiheuttamaan voimaan hidastaa liikettä. Liikkeen hidastamisessa kitkalla energia muuntuu lämmöksi, josta pitää päästä eroon. Jarruja jäähdytetään yleensä ilmalla, jota on siinä jarrujen ympärillä. Jarrulevyn materiaali voi myös olla sellainen, että lämpö siirtyy pois rakenteita pitkin. Mekaanisissa jarruissa on yleensä käytössä vipusuhde, jolla voidaan vaikuttaa hidastamiseen tarvittavaan voimaan. Tyypillisesti autojen käsijarru ja polkupyörän jarrut ovat mekaanisia. Mekaanisissa jarruissa on voiman välittäjänä jarrupolkimelta / -kahvalta jotain mekaanista, kuten vaijeri- tai sauvasysteemi. Yleensä käytetään vaijeria, koska se on kevyt ja sillä voidaan välittää voimaa pitkän matkaa. Raskas ja pitkä vipumekanismi olisi monin tavoin hankala käyttää. (Puhn 1985, s 6)

2.2.2 Hydraulinen jarru

Hydraulisessa jarrussa mekaaniset vaijerit ja vivut on korvattu jarrunesteellä täytetyillä letkuilla ja liittimillä. Ne välittävät voiman jarrupainikkeelta tai -kahvalta pääsylinterin kautta jarruille. Nesteellä painetaan mäntää ulospäin ja tällöin jarrupala painautuu jarrutuspintaa vasten aiheuttaen jarruttamista kitkan avulla. (Puhn 1985, s 6) Jarrunesteellä on tiettyjä vaatimuksia, jotta sen toiminta ei aiheuta vaaraa. Neste ei saa kiehua, jäättyä, puristua eikä saa aiheuttaa korroosiota tai muuten reagoida jarrujärjestelmän osien kanssa. Nesteen pitää virrata läpi sylintereistä ja letkuista minimaalisella vastustuksella ja muutenkin säilyttää ominaisuutensa kaikissa olosuhteissa. (Puhn 1985, s 63) Hydraulisessa järjestelmässä on pääsylinteri, jarrunestesäiliö, jarrulekut ja männät. Pääsylinterin koko vaikuttaa merkittävästi pysäyttämiseen vaadittavaan voimaan.

2.2.3 Pneumaattinen jarru

Pneumaattinen järjestelmä toimii paineilmalla, joka tuotetaan kompressorilla. Kompressorin saa käyttövoiman moottorilta. Paineilmajarruja käytetään suurissa tavarankuljetuksissa kuten rekoissa. Paineilmajarrujen käytön suurin syy on turvallisuus, sillä pieni vuoto paineilmaletkussa ei aiheuta totaalista jarrujen menetystä. (Puhn 1985, s 6) Paineilmajarruissa on aina jonkun verran viivettä polkimen painamisen ja jarrutustapahtuman välillä. Tätä viivettä voidaan pienentää releventtiileillä, jolloin käyttöpaine pysyy aina lähellä jarrutettavaa pyörää ja on siitä nopeasti ohjattavissa kitkapinnoille. Pneumaattisten jarrujen huonoja puolia ovat järjestelmän koko, monimutkaisuus ja hinta. Lisäksi paineilmaa tuotetaan ajoneuvon moottorilla, joten se kasvattaa polttoaineen kulutusta. Rekoissa paineilma jarrujen käyttö on kannattavaa, koska tila ei lopu kesken ja paineilmaa käytetään myös muihin toimintoihin ajoneuvossa. Lisäksi kuskin jalan voiman määrä ei vaikuta jarrutuksen tehokkuuteen, kun polkimella säädetään jarruille menevän ilma-aukon suuruutta. Paine pysyy tallessa säiliössä. (Puhn 1985, s 86)

3 JARRUTYYPIT

Tässä yhteydessä keskitytään pääasiassa ajoneuvoihin soveltuviin jarrutyyppeihin, jotka ovat mekaanisesti ohjatut rumpujarrut ja levyjarrut. Jarrutyyppejä on muitakin, mutta niitä ei yleisesti käytetä ajoneuvoissa, joten niitä ei sen takia käsitellä tässä työssä tämän enempää. Jarruttamista voi tehdä esimerkiksi ilmapinnan avulla aerodynaamisesti. Aerodynaamisia jarruja käytetään esimerkiksi tehokkaissa urheiluautoissa tehostamaan jarruttamista lisäämällä ilmanvastusta. Kiihdytysautoissa on laukaistava jarruvarjo, joka on ikään kuin laskuvarjo ajoneuvon perässä. Junissa on käytössä magneettikentän voimakkuuteen perustuvat elektronisesti ohjatut jarrut. Magneettikentän voimakkuutta säätämällä saadaan junan vaunujen renkaat hidastamaan vauhtia. Jarruttamista voi tehdä myös tavallisella autolla vaihtamalla vaihde pienemmäksi, jolloin moottorin sisäiset vastusvoimat ja pienempi välityssuhde pakottavat renkaan pyörimisnopeuden laskuun.

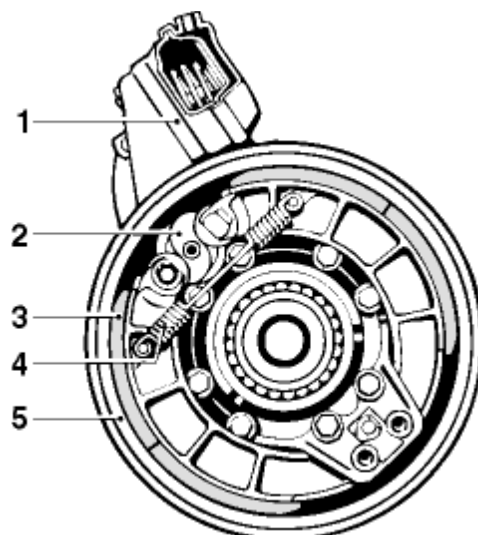
Tässä osiossa käydään seuraavaksi läpi kitkajarrujen kaksi tyypillisintä muotoa, levyjarru ja rumpujarru. Näistä uudempi on levyjarru, joka onkin jo lähes kokonaan syrjäyttänyt rumpujarrujen käytön autoteollisuudessa. FSO autoon sovellettavissa oleva inboard jarru voi olla toteutettu vain levyjarrulla. Muilla jarrutyypeillä ei saada aikaan sääntöjen vaatimaa kaikkien renkaiden yhtäaikaista lukkiutumista. Rumpujarrulla järjestelmästä tulisi monimutkaisempi ja vielä vaikeammin huollettava. FSO tiimillä on myös valmiina levyjarruihin liittyvät komponentit.

3.1 Rumpujarru

Vanhempi jarrujärjestelmä, jossa jarruttaminen tapahtuu suljetussa tilassa. Nykyisen kaltaiset ensimmäiset rumpujarrut keksittiin 1902. Kaikille renkaille jarrut asennettiin 1920-luvulla. Rumpujarrussa on jarrukengät, joilla painetaan jarrurumpua sisäpuolelta ja näin synnytetään liikettä hidastavaa kitkaa. (Puhn 1985, s 6) Rumpujarrun hyviä puolia on alhaiset elinkaarikustannukset ja käyttövarmuus. Huonoja puolia on suljettu tila josta lämpö, pöly ja muu lika ei pääse poistumaan, vaan ne jäävät haittaamaan rummun sisälle. Rumpujarrussa on myös useita yksittäisiä osia ja purkaminen ja huoltaminen ovat hitaita ja työläitä työvaiheita. Rumpujarrun rakenne selviää hyvin kuvasta 1.



Kuva 1 Rumpujarrun rakenne (Akebono)



Simplex- rumpujarru S-nokalla

1. Kalvosylinteri
2. S-nokka
3. Jarrukenkä
4. Palautusjousi
5. Jarrurumpu

Kuva 2 Yksinkertainen rumpujarrurakenne (Bosch 2002, s 976)

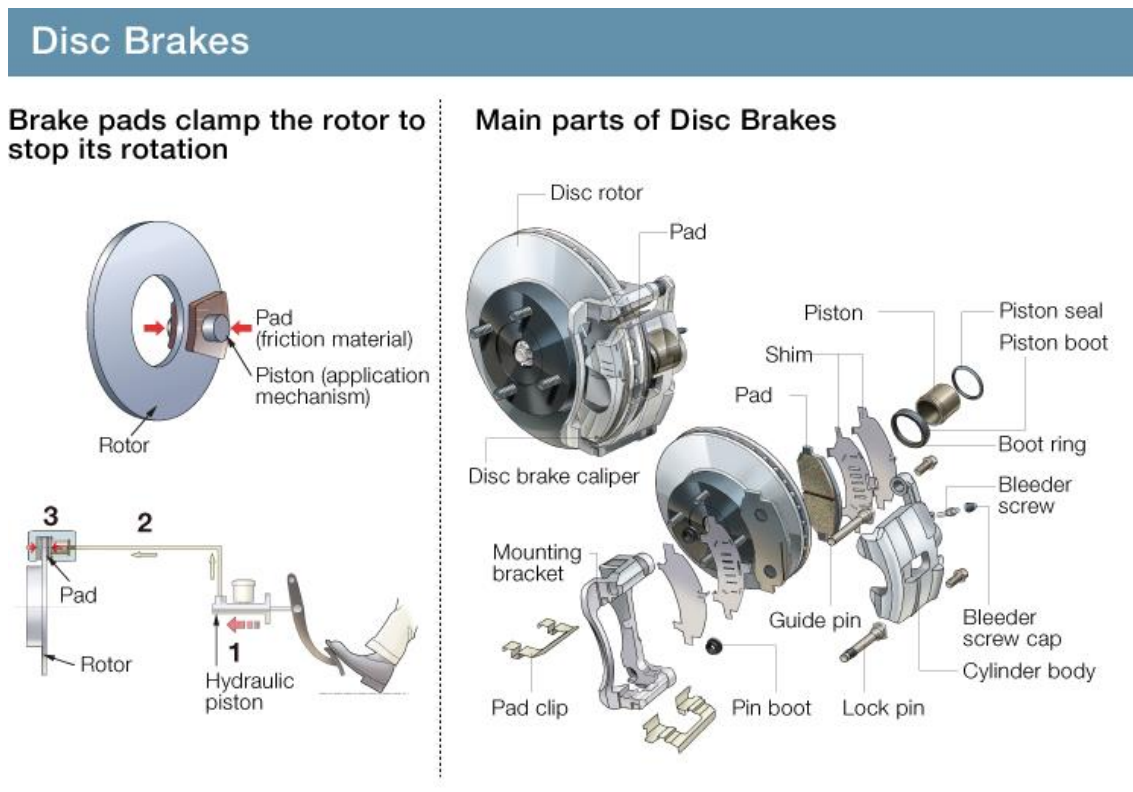
Simplex- rumpujarrun (kuvassa 2) hyviä puolia ovat tasaisen levityksen takia kenkien tasainen kuluminen, pitkäikäisyys, yksinkertainen mekanismi, luotettavuus, tarkka säädettävyys, helppo lisätä seisontajarrun yksinkertainen käyttö jousi systeemillä. Huonoja puolia ovat kookas ja painava rakenne, jarrukerroin on pieni (tarvitaan enemmän työtä jarruttamiseen) ja yksinkertaisessa rakenteessa etu ja takakenkien kuluminen eri aikaan, kun kääntö on vain toisesta päästä. (Bosch 2002, s 977)

3.2 Levyjarru

Levyjarrut on otettu tuotantoautoissa käyttöön 1949 ja 50-luvulla LeMans- kilpailun voitti jaguaarin auto, jossa oli levyjarrut. Siitä levyjarrut saivat valtavasti lisää suosiota myös kansanautoihin ja ne ovatkin nykyään suosituin jarrutyyppe. (Puhn 1985, s 7) Levyjarruissa on jarrusatulat ja levy, jota satulassa olevat jarrupalat puristavat. Levy on autoissa usein valurautaa ja polkupyörissä terästä. Levyn materiaalina toimii melkein mikä vain, kunhan materiaali kestää kitkan aiheuttamaa lämpenemistä ja hidastaa menopelin vauhtia riittävästi.

Levyjarrun etuja rumpujarruun verrattuna on, että jarruja voidaan käyttää paljon herkemmin, sisä- ja ulkopuolisten jarrupalojen kuluminen on tasaisempaa, levyjarrut ovat hiljaisemmat, jarrujen ominaisuudet pysyvät vakiona kulutuksesta riippumatta, levyjarrut jäähtyvät paremmin ja lika ei pääse kertymään haitaksi. Huonompina asioina on lyhyempi jarrupalojen käyttöikä ja yleensä korkeammat hankinta- ja käyttökustannukset. Jarrujen kehitystyö kuitenkin laskee hintaa ja samalla levyjen lämpötilakestävyys nousee. (Bosch 2002, s 978)

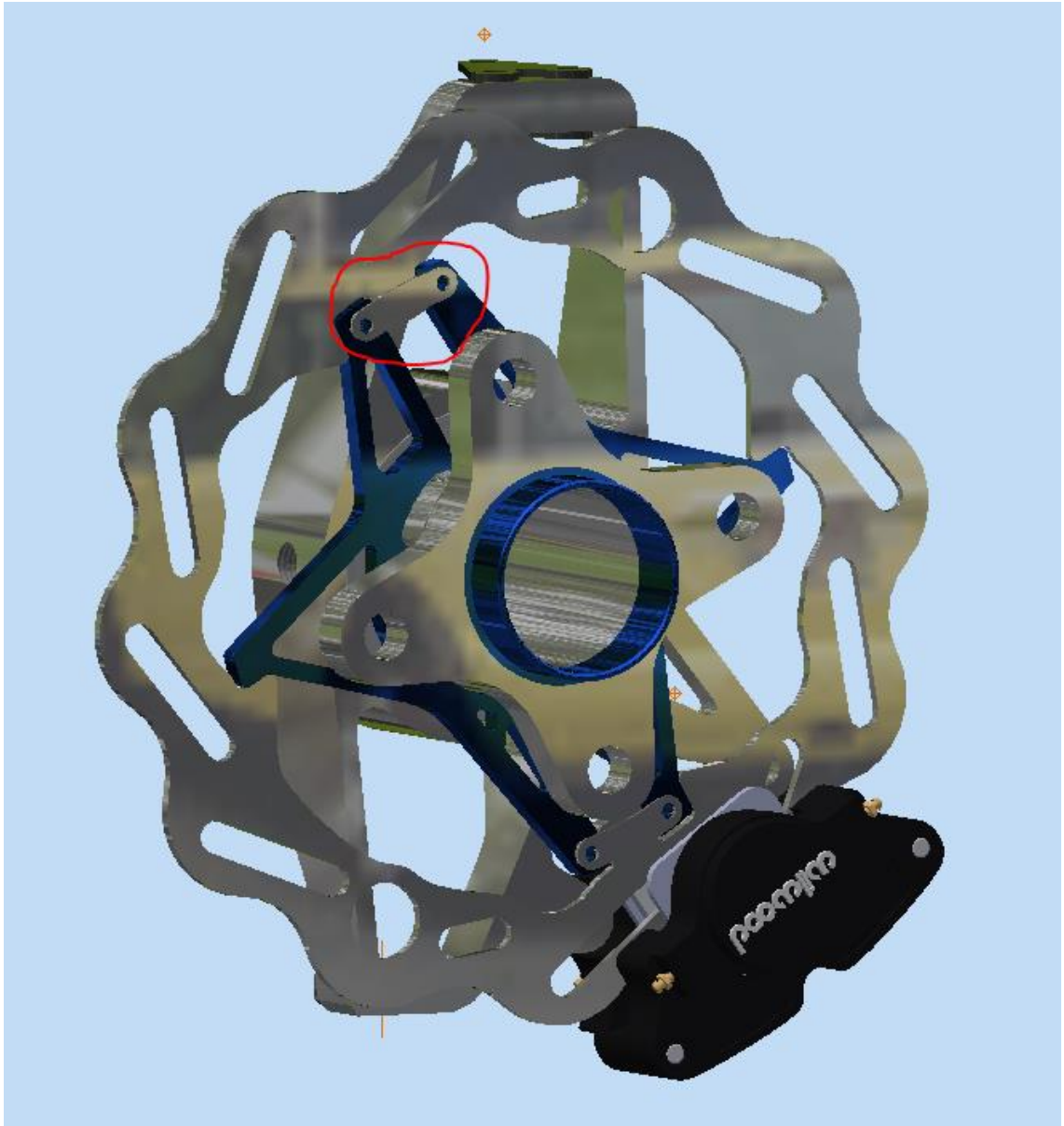
Levyjarrun tavallinen rakenne näkyy kuvassa 3. Rakenteessa on levy ja sen molemmiin puolin ovat jarrupalat. Jarrupaloja painetaan levyä vasten jarrusatulassa olevalla männällä.



Kuva 3 Levyjarrun rakenne (Akebono)

Levyjarru voidaan toteuttaa kelluvana tai kiinteänä. Jarrulevy on ajoneuvoissa yleensä kiinnitetty kiinni olka-akselissa heti vanteen takapuolella. FS tiimeillä on asiasta monia ratkaisuja, Oulussa olemme käyttäneet niin kiinteää kuin kelluvaa jarrulevyä. Kelluvan jarrulevyn voi toteuttaa esimerkiksi adapterilla olka-akselin ja jarrulevyn välissä. Levy pääsee kellumaan, kun adapteria ei kiinnitetä suoraan jarrulevyyn vaan adapterin molemmille puolille kiinnitetään levyt, joiden välissä itse jarrulevy pysyy. Kelluva jarrulevy pystyy keskittymään aina keskelle jarrusatulaa ja jarrupalojen väliin. Tämä auttaa jarrupaloja kulumaan tasaisemmin. Kuvassa 4 näkyy yksi mahdollinen toteutustapa kelluvan jarrulevyn kiinnittämisestä adapteriin. Tämä kuva on formulan suunnittelusta

etunurkasta. Kuvassa näkyvistä rei'istä jarrulevy kiinnitetään adapteriin niiteillä. Adapteri on kiinni olka-akselissa booreilla.



Kuva 4 Kelluvan jarrulevyn kiinnitys adapteriin

3.3 Inboard-jarru

Inboard jarru on kulkuneuvon akselilla lähellä keskustaa tai ihan keskellä oleva jarrutus paketti, mikä on käytännössä aina toteutettu levyjarrulla. Levyjarrut ovat jo pitkään olleet valtakäytössä jarrutekniikassa ja osaltaan siksi inboardit ovat aina levyjarruja. Rumpujarrua on vaikea asentaa keskelle akselia ja se olisi myös erittäin vaikea huoltaa. Huollettaessa inboard rumpujarrua koko akseli pitäisi ottaa pois, jotta rummun saisi auki.

Inboard jarrulla saavutetaan kaksi merkittävää etua tavallisiin jarruihin nähden. Ensiksi inboard jarruilla voidaan vähentää jousittamatonta massaa pyörännavoilta ja tämä parantaa auton käsiteltävyyttä. Toiseksi vanteen sisällä ei ole niin suurta tilavaatimusta, joten jarrulevyn koko voidaan valita riittävän isoksi. (Puhn 1985, s 98)

Inboardin huonoja puolia on usein tilan puute. Autoa ei haluta leventää perästä kovinkaan paljoa, ettei menetetä aerodynaamisia etuja. Jarrujen jäähdytys voi olla usein riittämätön, jos taka-akseli on umpinainen tai ilmavirran esteenä on paljon komponentteja. Esimerkiksi mönkijöissä avoimessa taka-akselissa levyt saavat enemmän ilmaa. FS sarjassa moottori on takana ja painopisteen sijainnin optimoimiseksi mahdollisimman alhaalla, joten se on suoraan taka-akselin ja jarrulevyjen edessä eikä ilmaa oikein pääse jäähdyttämään levyä. Lisäksi säännöt määräävät, että kaikki pyörivät osat tulee olla suojattuna suoralta kosketukselta. Tämä tarkoittaisi jonkinlaista koteloa tai seinää jarrulevyn eteen tai viereen, mikä taas huonontaisi ilman kiertoa jarrulevyn ympärillä.

4 FORMULA STUDENT

4.1 Mikä on Formula Student

Formula Student sarja on kansainvälinen insinööritaitojen kilpailu, jossa tiimit rakentavat vuosittain uuden yksipaikkaisen formula tyyppisen kilpa-auton ja osallistuvat sillä kisoihin. Kisoissa on dynaaminen ja staattinen osa-alue, joissa auton ja tiimin kisakuntoa koetellaan ja parhaalla tiimillä on hallussaan paras mahdollinen kokonaisuus, ei pelkästään nopein auto. (FSG 2020)

Formula täytyy katsastaa ennen kuin sillä pääsee ajamaan. Katsastus on tarkka ja ajoneuvon tulee täyttää kaikki sääntökirjassa mainitut pykälät, jotta se on turvallinen kaikille osapuolille. Katsastamisen lisäksi formulan pitää päästä läpi muutamasta testistä. Jarrutustestissä kaikkien renkaiden on lukittauduttava ja auton pitää pysyä käynnissä. Seuraavaksi kallistustestillä varmistetaan, että auton painopiste on tarpeeksi matalalla ja ettei autosta vuoda mitään nesteitä ulos. Lisäksi tehdään äänitesti mittaamalla auton vieressä desibelimittarilla äänenpaineen taso. Kaikki testit tulee suorittaa hyväksytysti läpi ennen kuin ajoneuville voidaan myöntää lupa kilpailla sarjan dynaamisissa osa-alueissa.

Dynaamisessa osuudessa on neljä erityyppistä ajo-ominaisuuksien testaus osiota. Ensimmäiseksi formulan tyyppisellä kilpa-autolla kisataan kiihdytyskilpailu 75 metrin matkalla. Toiseksi ajetaan skidpad, jossa formulalla ajetaan kahdeksikon mallista rataa ensin kaksi kierrosta vasempaan ja sitten kaksi kierrosta oikeaan. Jälkimmäisistä kierroksista otetaan aika. Seuraavaksi formulalla ajetaan autocross, jossa ajetaan rata-ajoa kaksi kierrosta kahdella mahdollisella kuljettajalla, nopeimman kierrosajan jäädessä voimaan. Kuskit ovat saaneet tutustua tähän rataan kerran kävelemällä sen läpi. Viimeisenä osa-alueena on formuloiden kestävyysajo, endurance, jossa on tarkoitus ajaa lähes yhtäjaksoisesti n. 22 km tiukkaa keiloilla rajattua rataa. Pitkä rata-ajo testaa ajoneuvon luotettavuutta ja kestävyyttä. Kisan aikana tiimi voi vaihtaa kuljettajaa yhden kerran ja kaadetuista keiloista tulee sanktioita. Endurance on FS kilpailujen päälaji, sillä siinä on jaossa eniten pisteitä.

Staattisessa osa-alueessa kerrotaan tuomareille perusteluja, raportteja ja tuloksia miksi mitään ratkaisuja on tehty ja kuinka niihin on päädytty. Design osuudessa tuomarit pyritään vakuuttamaan, että juuri omalla tiimillä on se paras design osien ja kokonaisuuksien suhteen. Cost tapahtumaan formulasta on tehty BOM (Bill of materials) eli tarkka osaluettelo, josta käy ilmi jokaisen komponentin laskennallinen hinta. BOM tehdään yleensä Excel-taulukkona osa-alueittain organisoimalla ja tiedon löytymisen helpottamiseksi. Taulukkoon kasataan auton kaikkien osa-alueiden kaikki komponentit ja niille muodostetaan materiaalin ja työstötavan mukaan koostuva laskennallinen hinta. Tuomarit kysyvät sattumanvaraisien komponenttien löytymistä taulukoista ja näin varmistavat, että taulukosta löytyy kaikki osat. Kysytyn osan puuttuminen listauksesta aiheuttaa miinus pisteitä. Formulasta muodostetaan näiden osahintojen perusteella laskennallinen hinta. Tiimien autojen hinnat laitetaan järjestykseen ja tämän järjestyksen perusteella tiimit saavat pisteitä.

4.2 Rajaavat sääntökohdat

FS sarjassa suunnittelua ohjaavia sääntöjä on sääntökirjassa yli 100 sivua ja jarruja koskevia kohtia on noin kaksi sivua ja monissa kohdissa on vielä lisää kohtia koskien turvalaitteita ja muita liittyviä asioita/osia. Jarrujen on oltava hydrauliset ja yhdellä ohjaimella toimivat. Jarrujärjestelmässä pitää olla kaksi erillistä piiriä ja kaikki renkaat on saatava lukkoon samanaikaisesti. Jarruletkuilla on omat vaatimuksensa ja letkujen sijainnistakin on mainintaa säännöissä. Jarrupolkimen pitää kestää 2kN voima ilman minkäänlaisia vaurioita. Jos toisessa hydraulikkapiirissä ilmaantuu vika ja jarrunestettä vuotaa ulos niin auton täytyy sammua. Jarrulevyihin ei ole suoraan sääntökohtia eikä säännöillä ole määrätty jarrujen sijaintia vanteen sisälle tai vetoakselin alkupäähän tai muualle. Jarrulevyn paksuutta tai kokoa ei myöskään ole säännöillä tarkasti rajattu. Jarrujärjestelmän toimivuus varmistetaan muilla kohdilla. Tämä mahdollistaa inboard jarrujen suunnittelun aika vapaasti. (FSG 2019, s 47,48)

4.3 Aikaisemmat jarrut FSO:n tiimissä

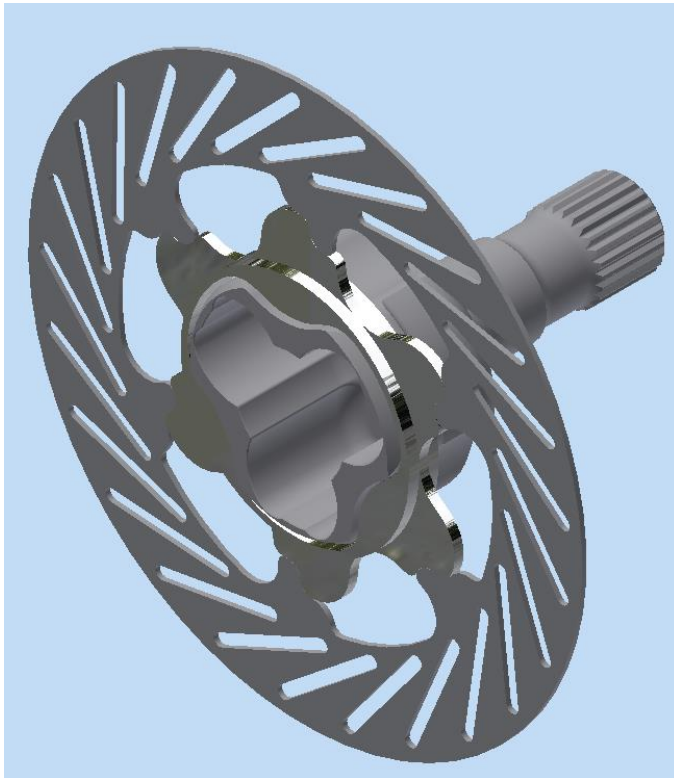
Tähän asti Oulun tiimi on käyttänyt pyörännavoissa sijaitsevaa levyjarrua. Levyn kiinnityskohta ja tapa on hiukan muuttunut tiimin kausien aikana, mutta koko ajan on ollut käytössä levyjarru. Aikaisemmin jarrulevy on ollut kiinnitettynä suoraan napaan niiteillä. Seuraavassa kehitysversiossa navalle lisättiin adapteri, johon vasta itse levy kiinnitettiin. Tämä muutos tehtiin helpottamaan jarrulevyn vaihtamista, sillä aiemmassa versiossa jarrulevyt niitattiin kiinni sellaisessa vaiheessa kasausta, että niitä ei voinut enää irrottaa. Levyä on ohennettu pelkän kokemuksen pohjalta, kun on huomattu, että levy on kestänyt liiankin hyvin. Aiempi jarrulevy oli viisi millimetriä paksu teräksinen levy. Uudempi levy tehtiin kolmen millin paksuisesta levystä, jotta saavutettiin autosta painonsäästöä useampi sata grammaa. Käytetty materiaali on ultralujaa terästä, jonka murtolujuus on 700Mpa. Ohuempi levy ei ollut jarrusatuloiden speksien mukaan enää mahdollinen, mutta asiaa päätettiin kokeilla. Testauksessa todettiin asian kuitenkin toimivan ja suunnitellulla ratkaisulla ajettiin koko kausi. Jarruissa ja jarruttamisessa ei ollut pienintäkään ongelmaa koko kauden aikana. Kauden jälkeen kuitenkin huomattiin, että jarrupalojen kuluessa niitä työntävät männät ovat lähellä tulla ulos satulasta. Tämä johtui ohuemmasta jarrulevystä, kuin satulalle on tarkoitettu. Ohuempi jarrulevy kesti siihen kohdistuneen lämpökuorman vielä juuri sopivasti. Jarrulevyissä voitiin kauden jälkeen havaita silmin nähtävästi taipumaa, joka on aiheutunut lämpötilan muutoksista ja myös mahdollisesti hiukan liian ohuiksi jätetyistä tukimateriaaleista. Levyn jäähdytysreikien muotoa muuttamalla saadaan paksumpi tukimateriaali ja vähennetään levyn lämpötilamuutoksista johtuvaa taipumista. Levyn paksuus voidaan kuitenkin pitää tällaisena kolme millimetriä paksuna, kunhan tilannetta seurataan ja tarvittaessa jarrulevy tai jarrupalat vaihdetaan.

5 INBOARD JARRUJEN TOIMIVUUS FSO AUTOSSA

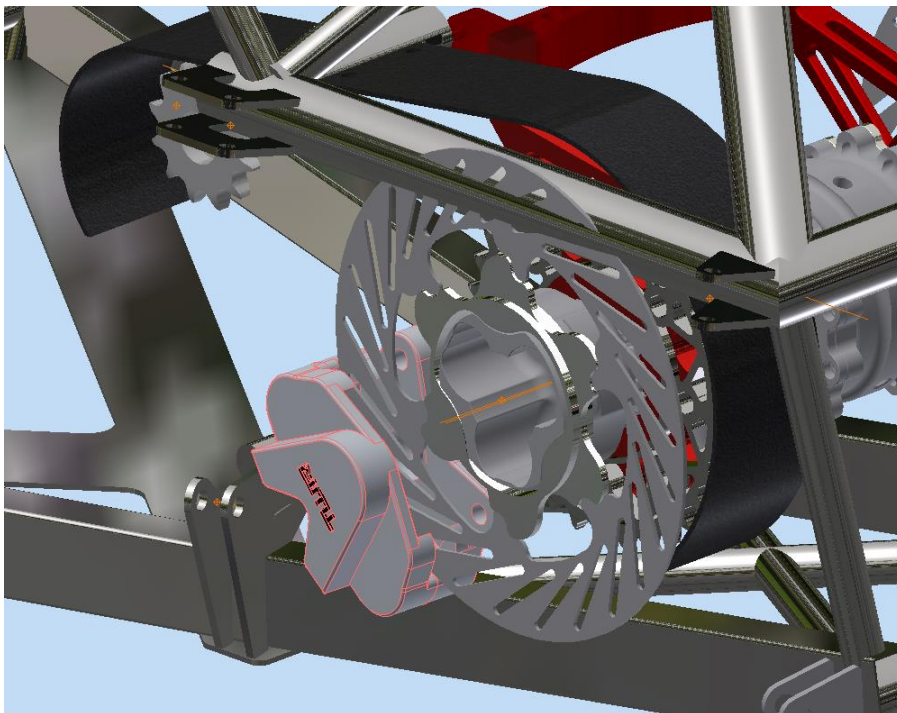
Tässä käydään läpi inboard jarrujen sopivuutta FSO:n autoon. Konsepti-idean toimivuutta ja sen huonoja puolia. Lopuksi vielä mietitään kuinka uutta konseptia voisi turvallisesti testata.

5.1 Jarrujen sijoittelu

Inboard jarrua ei voi FSO:n autossa toteuttaa yhdellä jarrulevyllä, sillä autossa on tasauspyörästö. Lisäksi säännöt määräävät, että kaikkien renkaiden on lukkiuduttava täysjarrutuksessa. Tämän takia FSO:n autossa myös inboard jarruja olisi oltava kaksi kappaletta. Ne voitaisiin sijoittaa heti tasauspyörästön viereen vetoakselin pään, tripodikupin ympärille kuvan 5 osoittamalla tavalla. Silloin jarrusatuloiden kiinnitys voisi tapahtua tasauspyörästön kanssa samaan kiinnikkeeseen tai lisäämällä kiinnityskohdat rungon alareunan putkiin. Nykyisellä rungolla ei ole tilaa laittaa tällaisia inboard jarruja tähän paikkaan, sillä ketjupyörä ja ketju ottavat haltuun kaiken tilan runkoputkien läheisyydestä. Kuva 6 selventää tilaongelmaa ja näyttää kuinka jarrulevy tulisi läpi runkoputkesta ketjupyörän puolelta. Asialla ei tässä vaiheessa ole suurta painoarvoa, sillä tämän tyyppiset jarrut tehtäisiin aivan uuteen autoon ja uuteen runkoon. Uuden rungon suunnittelussa voidaan määrittää tarvittava tilantarve myös jarrujen osalta. Rungon leventäminen takaa ei ole kuitenkaan kovin mielekästä, koska leveämpi runko on painavampi ja aerodynaaminen hyöty pienenee. Inboard jarruille ei FSO:n autossa ole muita mahdollisia sijoituskohtia. Keskelle vetoakselia ei saa millään järkevällä tavalla kiinnitettyä jarrupakettia. Vetoakselin suoja tai itse vetoakseli ei myöskään kestäisi sellaista vääntävää kuormitusta. Lisäksi vetoakselin ympärillä on tukivarsia joihin jarrulevy sitten osuisi. Seuraava kohta onkin jo vanteen sisäpuolella, missä jarrut sijaitsevat nykyisin. Toki jarrut sijaitsevat olka-akselin toisella puolella. Niitä ei olisi kuitenkaan mitään hyötyä mahdollistaa sisäpuolelle olka-akselia, koska se vaikeuttaisi huomattavasti kasaamista ja jarrujen huoltamista. Lisäksi sillä ei saavutettaisi sitä suurinta hyötyä, mitä jarrujärjestelmän siirrolla haluttaisiin saavuttaa. Suurin hyöty jarrujen siirrossa olisi saada jousittamatonta massa pienemmäksi. Tripodikuppi on valmistettu teräksestä ja se kestänee jarruvoimat, kunhan ne jakaantuvat tasaisesti.



Kuva 5 Jarrunlevyn kiinnitys tripodikupin päälle



Kuva 6 Inboard jarrut sijoitettuna nykyiseen runkoon.

5.2 Inboard jarrujen hyviä puolia

Suurin syy miksi inboard jarrut olisivat perusteltavissa, on saada pienennettyä auton jousittamatonta massaa. Jousittamattoman massan pienennys parantaa aina auton käsiteltävyyttä. Jousittamaton massa vaikuttaa eniten juuri jousituksen toimivuuteen, sillä jousien ja iskunvaimentimien täytyy vastustaa jousituksen ja rengaspaketin aiheuttamaa liikettä mutkissa ja töyssyissä. Jarrusatulan ja levyn kaltaiset isot osat voitaisiin poistaa vanteen sisältä ja tämä mahdollistaisi myös vanteen pienentämisen. Pienempi vanne ja pienempi rengas ovat kevyempiä kuin isommat komponentit ja pienentäisivät jousittamatonta massaa entisestään. Lisäksi tässä sarjassa auton paino on erityisen tärkeää. Autojen tehot on rajoitettu säännöillä ja siten kaikilla tiimeillä on lähes samat tehot, niin paino ratkaisee nopeimman ajan. Massaa saadaan siirrettyä samalla keskemälle autoa ja näin parantaa auton vakautta. Uudet kiinnikkeet jarrusatulalle voivat pienentää niiden massaa. Olka-akselia voisi hiukan pienentää ja keventää. Yksi pieni painonsäästö saataisiin myös jarruletkujen lyhentymisellä tukivarsien mitan verran molemmilta takarenkailta.

5.3 Mahdollisia ongelman aiheuttajia

Tampereen FS tiimillä on ollut jarrujen jäähtyvyysongelmia inboard jarrujen kanssa, sillä moottori on suoraa jarrujen edessä ja jäähdytysilman ohjaaminen jarruille on hiukan haastavaa. Yksi mahdollisuus olisi muotoilla auton pohjakate ohjaamaan ilmaa jarruille. Tämän toimivuutta on kuitenkin vaikea simuloida ja tiimin resursseihin nähden olisi vain testattava uutta konseptia, löytää ongelmat ja ratkaista ne. Simuloiminen onnistuu CFD (Computational fluid dynamics) laskennan avulla, kunhan tiedetään ainakin jarrulevyihin muodostuva lämpötila jarruttaessa ja liikenopeus. Jarrulevyn lämpötilaa voidaan mitata laser- lämpömittarilla rata-ajon jälkeen varikolla pysähdyttäessä. Toinen asiaa haittaava tekijä on tilanpuute. Uudet jarrut suunniteltaisiin uuteen ja leveämpään runkoon. Rungon leventäminen kuitenkin kasvattaa ajoneuvon massaa. Lisäksi massaa voisi tulla lisää jarrusatulan kiinnikkeistä. Jarrulevy lämpenee aika paljon ja tämä pitää myös ottaa huomioon muiden samassa paikassa olevien osien kanssa.

5.4 Testaus

Jarrujärjestelmän muutos siirtämällä takajarrupaketti inboardiksi on kuitenkin aika iso operaatio, sillä muutos vaikuttaa rungon leveyteen ja siten myös tukivarsien pituuteen. Epävarmalla pohjalla olevaa ideaa pitää miettiä tarkasti ja selvittää vaikutukset muihin osiin. Jarrut ovat myös erittäin tärkeä osa auton turvallisuudessa, joten ihan mitä tahansa ei voida noin vain kokeilla. Uuden konseptin testaaminen pitää tehdä erityistä varovaisuutta noudattaen. Testaus pitää pystyä suorittamaan koeolosuhteissa ilman, että kenenkään tarvitsee autolla ajaa. Testausta voidaan tehdä tiimissä teoreettisen selvityksen jälkeen rakentamalla suunniteltu versio ja asentamalla se paikoilleen. Uuden jarrujärjestelmän ollessa valmiina testausta varten auto nostetaan ilmaan maasta ja sitten voidaan renkaat kiihdyttää haluttuun vauhtiin ja painaa jarrua. Tämä testausmetodi ei kuitenkaan anna täysin oikeita tuloksia, mutta selvästi havaittavan toimivuuden konseptista. Seuraava testi on erittäin varovainen ajo isolla varoalueella. Autossa on toimiva etujarrupiiri niin auton vauhtia voi kuitenkin hidastaa, vaikka uudessa jarrusysteemissä ilmenisi vikaa. Tässä tapauksessa iso varoalue ja riittävän pienillä nopeuksilla testaaminen olisi riittävän turvallista. Jarrujärjestelmän toimiessa voidaan testata pidempää ajoa ja jarrujen jäähtyvyyttä.

6 KÄYTTÖ MUUALLA

Inboard jarruja käytetään muissa sarjoissa ja ajoneuvoissa jonkun verran. Käyttö on kuitenkin aika vähäistä. Itse olen nähnyt inboard jarruja käytössä mönkijöissä, joissa jarrulevy on sijoitettu keskelle avointa taka-akselia. Formula Student sarjassa inboard jarruja on käytössä joillakin tiimeillä. FS-sarjassa on mahdollista ja hyödyllistä käyttää pieniä renkaita pienentämään auton massaa. Pienen renkaan sisälle ei välttämättä mahdu riittävän isot jarrulevyt, jolloin jarrut täytyy toteuttaa inboardina tai suunnitella jokin muu toimiva tapa. FS-sarjassa näkee myös erikoisempia ratkaisuja. Olen nähnyt, että jarrulevy on integroitu vanteeseen kiinni ja jarrusatula on sijoitettu keskelle. Ulkokehäjarrut eivät välttämättä ole kevyemmät tai paremmat, mutta erilaisella designilla saadaan ainakin tuomareiden huomio. Ulkokehäjarruja ajatellessa tulee mieleen ratkaisun mahdollinen kalleus ja käytännön vaikeus esimerkiksi renkaan vaihdon yhteydessä.

Tampereen FS tiimi on ainakin käyttänyt inboard jarruja autossaan ja siellä on ollut ongelmaa jarrujen jäähtyvyyden kanssa. Inboard jarrujen sijainti moottorin takana ei ole hyvä ilmavirtausten kannalta.

Eri rallisarjoissa on välillä nähty inboard jarrujen käyttöä yksittäisten kilpatiimien toimesta. Inboardeista saatava hyöty jää ilmeisesti vain jousittamattoman massan pienentymiseen, mutta muuten inboardeissa on suuria käytännön haasteita lämpötilan ja huollettavuuden kanssa. Vaikeuksien takia inboard jarrut eivät ole saaneet suurempaa suosiota. Inboard jarruja kokeiltiin 1960 ja -70 luvuilla useissa eri ajoneuvoissa. F1 sarjassa Lotus 72 autossa oli inboard jarrut. Jarrut kuitenkin lämpenivät liikaa ja ne muutettiin takaisin perinteisiksi renkaan navassa sijaitseviksi jarruiksi lämpenemisen estämiseksi.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä käytiin läpi jarrujen erilaisia tyyppejä ja erilaisia tapoja ohjata eli käyttää jarruja. Tarkemmin perehdyttiin mekaanisiin rumpu- ja levyjarruihin. Levyjarrut ovat nykyään suosituimmat kaikissa tavallisissa autoissa, ja niillä voisi toteuttaa myös inboard jarrut FSO:n autoon. Toteutuksessa on kuitenkin asioita, joita tulee ottaa huomioon ennen valmistamista. Suurimmat huolenaiheet ovat tilanpuute ja levyjen riittävä jäähtyminen. Inboard jarrut eivät mahdu nykyiseen runkoon mitenkään. Asiaa täytyisi pohtia silloin kun ollaan suunnittelemassa uutta runkoa. Jäähtymistä olisi syytä tutkia virtauslaskennalla lisää ja mahdollisuuksia ohjata jäädytysilmaa jarrulevyille pohjalevyn kautta. Jarrujen sijainti moottorin takana on vaikea paikka jäähdyttää jarrulevyjä. Hyötyä inboardeihin siirtymisessä olisi saada jousittamatonta massa vähemmäksi ja painoa keskemäs autoa. Inboard jarrujen hyödyt parantavat auton käsiteltävyyttä ja siten tuovat parempia tuloksia ja aikoja rata-ajossa. Tarkempi suunnittelu paljastaisi kokonaistilanteen auton massan suhteen. Tässä työssä ei tehty niin tarkkaa suunnittelua, että olisi mahdollista tietää onko inboard jarrut kevyemmät vai painavammat kuin nykyiset levyjarrut.

8 LÄHTEET

Akebono brake industry, 2020, Value Creation Model 2020 [verkkodokumentti]. Global: Akebono brake industry co. Saatavissa <https://www.akebono-brake.com/english/corporate/business/business4.html> [Viitattu 16.12.2020]

Bosch, R. 2002. Automotive Handbook. 1.painos, Bosch, 1391s

FSG, 2019. Formula Student Rules 2020 [verkkodokumentti]. Germany: Formula Student Germany. Saatavissa: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf [Viitattu 15.5.2020], 133 s

FSG, 2020. About [verkkodokumentti]. Germany: Formula Student Germany. Saatavissa: <https://www.formulastudent.de/about/concept/> [viitattu 15.5.2020].

Limpert, F. 1999. Brake Desing and Safety. Second edition. USA: Society of Automotive Engineers SAE

Milliken, W.F. & Milliken, D.L., 1995. Race car vehile dynamics. USA: Society of Automotive Engineers SAE, 890 s

Puhn, F. 1985. Brake Handbook. USA: HPBooks